

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.23.022

基于来水组成模型的流域水环境调度研究

陈凯^{1,2}, 王杰², 翟月², 李小宁¹

(1. 江苏大学 环境与安全工程学院<应急管理学院>, 江苏 镇江 212013; 2. 南京慧水软件科技有限公司, 江苏 南京 210036)

摘要: 深圳河上游流经丘陵区,下游河段为感潮河段,且水环境容量不足、水动力条件差。考虑到其复杂的水系及地理特征,基于水循环机理及污染物运移转换规律,建立水量水质耦合模型,并由实测资料验证其准确性;建立来水组成模型,分析深圳河主要控制断面的水质改善效果。结果表明,金湖下库的调水效果优于深圳水库,10~20 m³/s 调度流量下金湖下库来水可提前10 h改善河口水质;同时,深圳河断面水质浓度在降雨量<25 mm时呈现上升趋势,超过25 mm后呈现下降趋势。该模型可较好地适用于深圳河湾流域,相关结果可为水环境调度决策应用提供一定参考。

关键词: 深圳河湾流域; 水环境调度; 耦合模型; 来水组成模型; 水质改善

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)23-0150-06

Basin Water Environment Scheduling Based on Water Component Model

CHEN Kai^{1,2}, WANG Jie², ZHAI Yue², LI Xiao-ning¹

(1. School of the Environment and Safety Engineering <School of the Emergency Management>, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Nanjing Huishui Software Technology Co. Ltd., Nanjing 210036, China)

Abstract: The upper reaches of the Shenzhen River traverse hilly terrain, whereas the lower reaches consist of tidal river segments characterized by limited water environmental capacity and unfavorable hydrodynamic conditions. Considering the complex hydrological system and geographical characteristics of the region, a coupling model of water quantity and water quality was developed based on the principles of the hydrological cycle and the mechanisms of pollutants transport and transformation. The model's accuracy was validated using field measurement data. Additionally, a water component model was established to assess the water quality improvement effects at key control sections of Shenzhen River. The water scheduling performance of Jinhu Lower Reservoir was superior to that of Shenzhen Reservoir. Under a regulated flow rate ranging from 10 m³/s to 20 m³/s, the inflow from Jinhu Lower Reservoir could enhance the water quality at the estuary 10 hours in advance. In contrast, the water quality concentration at monitoring sections of Shenzhen River exhibited an increasing trend when the rainfall was below 25 mm, and a decreasing trend when rainfall exceeded 25 mm. This model is highly applicable to the Shenzhen River Bay Basin, and the obtained results can serve as a valuable reference for water environmental management and scheduling decision-making.

Key words: Shenzhen River Bay Basin; water environment scheduling; coupling model;

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(42207057); 江苏大学高级人才基金资助项目(JDKQ20240405)

通信作者: 李小宁 E-mail: xzl0938@hhu.edu.cn

water component model; water quality improvement

近年来,深圳市政府大力推进水环境治理基础设施工程建设,但是由于历史原因以及实际情况,很多区域无法进行雨污分流,采用末端截流的方式进行处理,该方式导致的结果是:水质净化厂负担较大,在降雨较大的情况下,无法完全处理的合流制污水仍然沿着雨水管网或截污箱涵排入河道,致使部分河段存在不同程度的污染。目前,已有不少学者对深圳河湾流域水环境问题进行了研究,但大多是从污染源角度出发,定性分析造成水污染的原因,并未针对深圳河湾流域水环境现状提出日常或应急水环境调度状态下相对可行且有效的工程措施^[1-3]。笔者从深圳河湾流域水环境现状出发,采用水量水质耦合模型^[4]分析河道水质污染物变化规律,根据流域特点构建深圳河湾流域来水组成模型,通过不同角度模拟计算河道重点断面的水质改善效果,进而得出深圳河湾流域较为可行的水环境调度方案,以期在实际工程调度提供参考。

1 研究方法

基于团队自主开发的慧水模型系统^[4-6],以深圳河湾流域深圳河断面水质达标为目标,以深圳河流域为研究区域,构建水文-水动力-水质耦合模型,经率定和验证后,用于分析评估不同方案的水质改善效果。

1.1 研究区域概况

深圳河位于深圳市与香港特别行政区的交界处,干流河长约14 km,河床比降为0.126%;深圳河有一级支流5条,二、三级支流30余条。深圳河三岔河口以下均为感潮河段,受深圳湾潮位影响严重。收集2018年11月—2019年3月的水质连续监测资料,对标地表V类水质标准分析深圳河口断面水质情况,旱天深圳河口的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP浓度可稳定达到地表水V类标准,但雨天深圳河口的氨氮可达2.5~5.0 mg/L、总磷为0.4~0.6 mg/L,难以达到地表水V类水标准,降雨溢流对深圳河口水质影响显著。从各水质指标检测值的变化过程来看,深圳河口断面水质十分不稳定,且超标频次较多。

1.2 水量模型

① 零维模型

对于湖泊、水库这类调蓄水面,主要采用水量

平衡原理进行描述,通过对湖面水位分析来反映其水量交换的变化规律。采用公式(1)进行描述。

$$\sum Q = A_z \frac{\partial Z}{\partial t} \quad (1)$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; Z 为水位, m ; A_z 为面积, m^2 ; t 为时间, s 。

② 一维河道模型

通过公式(2)描述一维河道水流运动规律:

$$\begin{cases} B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gA \frac{|Q|Q}{K^2} = qV_x \end{cases} \quad (2)$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; A 为河道断面过水面积, m^2 ; B 为河道宽度, m ; Z 为水位, m ; q 为河道的旁侧入流量, m^3/s ; V_x 为流速分量, m/s ; K 为流量模数; α 为动量校正系数; x 为空间, m 。

1.3 水质模型

① 零维湖泊水质模型

在水质模型中,将水库、湖泊概化为零维调蓄节点,采用如下公式进行描述:

$$\frac{d(VC)}{dt} = \frac{VS}{86400} + S_w \quad (3)$$

式中: C 为水质浓度, mg/L ; V 为体积, m^3 ; S 为水质生化反应项, $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$; S_w 为水质外部源汇项, g/s 。

② 河网一维水质模型

针对河网水质模拟,采用如下方程进行描述:

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(UAC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AE_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{AS}{86400} + S_w \quad (4)$$

式中: E_x 为纵向分散系数, m^2/s ; U 为平均流速, m/s 。其中, $E_x = \alpha_e C_0 \theta^2 q$, α_e 为系数,取0.01; C_0 为谢才系数; θ 为断面宽深比; q 为断面平均单宽流量, m^3/s 。

1.4 来水组成模型

来水组成分析以水质模拟计算为基础(见图1),对于任何一个河段或断面,各种来水组成比例总和等于1.0或100%。构建深圳河湾流域河网来水组成模型,设置不同来源的水(如:排污、河网初始水、边界来水),对河网内部水进行标识,通过来

水组成模拟系统,对不同来源的水进行模拟,并在空间上进行呈现。

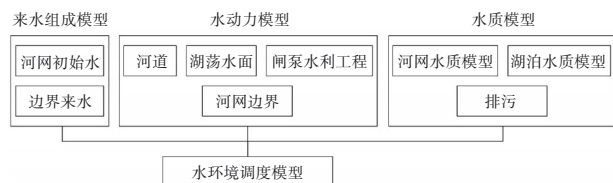


图1 水环境调度模型耦合关系

Fig.1 Coupling relationship of water environment scheduling model

① 基本原理

采用保守物质描述水源运动规律,通过定义不同保守物质名称来区分来水水源,并采用保守物质水质模型,模拟河道中保守物质的变化规律,以此获得各河道断面不同水源的水体组成情况。

② 基本方程

采用对流方程描述保守物质的运动规律,如下所示:

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

式中: A 为过水面积, m^2 ; Q 为流量, m^3/s ; C 为水质浓度; t 为时间, s ; x 为空间, m 。

③ 保守物质的定义

针对模型中对边界条件设置的保守物质浓度统一定义为 1.0,即流出边界条件的保守物质不受流入边界条件的影响。

2 模型构建及率定与验证

2.1 水文模型构建

研究区域为深圳河湾流域,地理面积为 219.5 km^2 ,地形多为山区,考虑到降雨空间分布以及不同区域的产流参数差异情况,依据 DEM 地形高程确定

深圳侧水文模型分区为 20 个,香港侧确定为 10 个分区。针对流域汇流模拟,本次模型对研究区域按河网的分布进行河网多边形划分,同时在河网多边形内部考虑加入 DEM 高程的影响(见图 2)。

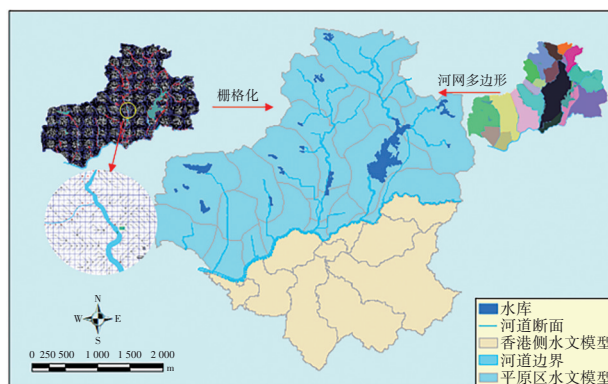


图2 模型构建处理概化示意

Fig.2 Generalized diagram for model construction

2.2 动力学要素概化

模型共计构建一维河道 27 条,约 104.6 km ,河道糙率取值范围为 $0.02 \sim 0.04$;水库及蓄滞洪区概化为零维区域,由底高相应容积和水位面积关系描述水库地形,共计 13 个;各河道连接处水闸 11 座,通过闸门宽度和底高等规模信息构建,指定流入和流出信息描述其拓扑关系。

2.3 污染负荷处理

按照水质净化厂污水收集范围将深圳河湾流域划分为 5 个片区:福田水质净化厂、滨河水质净化厂、布吉污水处理厂、罗芳水质净化厂以及埔地吓污水处理厂。根据收集到的各分区人口数量、畜禽养殖情况,以及各污染源的产污当量、各路径处理比例和去除率,将其以污染负荷的方式输入模型。污染负荷成果具体见表 1。

表1 污染负荷数据

Tab.1 Pollution load data

项目	滨河水质净化厂			罗芳水质净化厂			布吉污水处理厂			福田水质净化厂	
	2016年	2017年	2018年	2016年	2017年	2018年	2016年	2017年	2018年	2017年	2018年
处理水量/ 10^8 m^3	1.06	1.00	1.10	1.15	0.93	1.11	0.85	0.86	0.78	1.15	1.30
COD/ 10^4 t	5.85	4.80	4.62	4.26	4.00	5.78	1.76	2.62	2.43	3.30	3.87
$\text{NH}_3\text{-N}/10^4 \text{ t}$	0.37	0.35	0.36	0.23	0.18	0.21	0.16	0.16	0.22	0.31	0.29
TP/ 10^4 t	0.08	0.06	0.04	0.04	0.04	0.09	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05

注: 埔地吓污水处理厂未收集到具体产污数据,模型中采用水质浓度边界进行处理。

2.4 边界条件确定

模型构建边界包含水量模型边界和水质模型边界。水量模型计算采用的边界条件为上游流量

边界和下游潮位边界,由区域降雨及蒸发作为水文模型的输入进行产汇流计算,汇流至河道后进行水动力演算。上游河道与水库连接,拟采用水库下泄

流量资料作为上游流量边界,保证模型的计算。水质模型采用面源污染作为上游水质边界,下游深圳河口水质边界选用深圳河口站点实测水质数据。

2.5 模型率定与验证

① 水量模型率定

水量模型率定站点选取沿深圳河干流的3个代表站点,分别为三岔河口站、文锦渡站和鹿丹村站;根据水文资料同步性以及时段代表性分析,选取2018年7月作为率定代表时段。水量模型率定结果见图3。可以看出,沿深圳河3个站点的模型计算值与实测值拟合均较好,三岔河口站的模型计算峰值水位为2.62 m,实测值为2.65 m,误差为3 cm,峰现时间模拟值相比实测值提前1 h;文锦渡站的模型计算峰值水位为2.58 m,实测值为2.57 m,误差为1 cm,峰现时间模拟值相比实测值提前1 h;鹿丹村站的模型计算峰值水位为2.51 m,实测值为2.50 m,误差为1 cm,峰现时间模拟值与实测值相同。可知,各代表站点的峰值水位偏差保持在5 cm以内,峰现时间误差均保持在1 h之内,表明模型的模拟准确度较高。

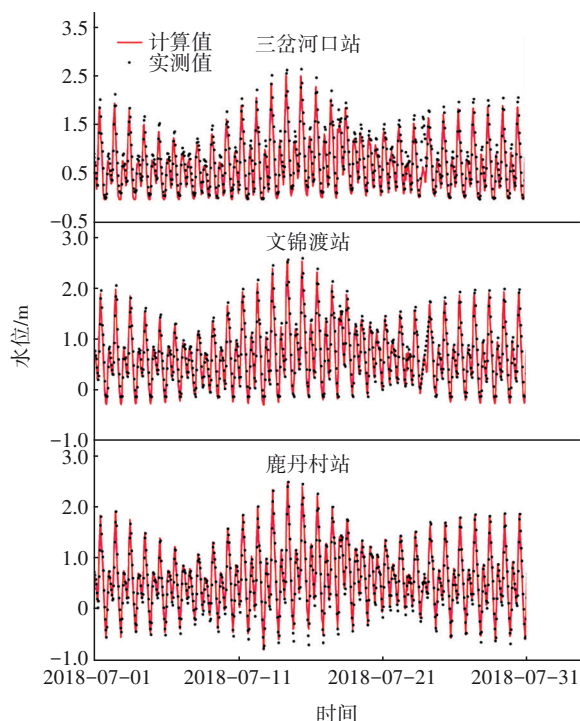


图3 水量模型率定结果

Fig.3 Calibration results of water quantity model

② 水质模型率定

水质模型率定站点沿深圳河选取3个,从上游

至下游依次为:采石场站、鹿丹村站和桃花路站。根据水文资料同步性分析,亦选取2018年7月作为率定代表时段,与水量模型保持一致。水质模型率定结果见图4,水质实测值基本上均位于计算值曲线附近,水质计算值曲线变化趋势与实测值变化趋势较为一致,表明模型计算值与实测值吻合较好,可用于模型方案计算分析。

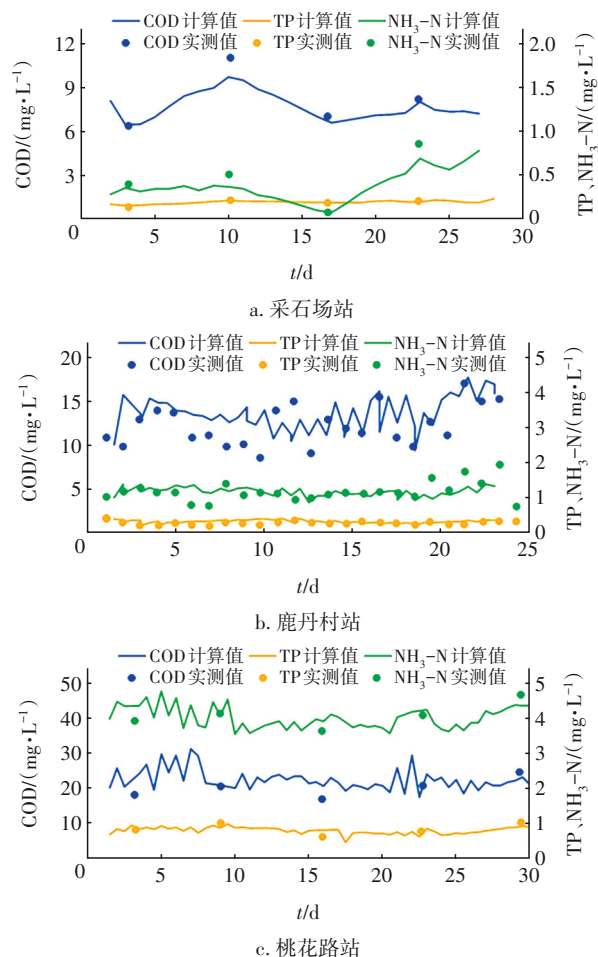


图4 水质模型率定结果

Fig.4 Calibration results of water quality model

3 深圳河湾流域水环境调度研究

3.1 断面水质与降雨规律性分析

以鹿丹村和福田口岸为例,通过设置不同的未来24 h降雨等级,选取0、7、10、20、25 mm五个等级,模拟深圳河湾流域的降雨溢流污染规律,分析各监测断面的水质变化情况。结果表明,当降雨量分别为0、7、10、20、25 mm时,鹿丹村断面的氨氮浓度分别为2.30、2.75、3.15、4.62、4.21 mg/L,福田口岸断面的氨氮浓度分别为2.35、2.70、3.02、3.45、3.08 mg/L。随着降雨量的增大,两个断面的水质污染物

浓度均呈上升趋势,当降雨量增大到25 mm时,污染物浓度开始呈现下降趋势。

3.2 深圳河各断面来水组成分析

为研究各水库对下游河道的水质改善效果,以深圳水库为调水对象,选取文锦渡和福田口岸两个站点为研究目标,通过设置不同的深圳水库泄洪闸调度流量,计算目标断面处任一时刻的深圳水库来水占比情况,结果见图5。可知,当深圳水库调水流量为 $8 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,文锦渡断面处深圳水库来水占比最大可达到60%,当调水流量增大到 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 时此占比最大可达到85%。由于福田口岸断面水体组分较多,同时受潮位顶托影响严重,因此深圳水库来水占比相对较小。

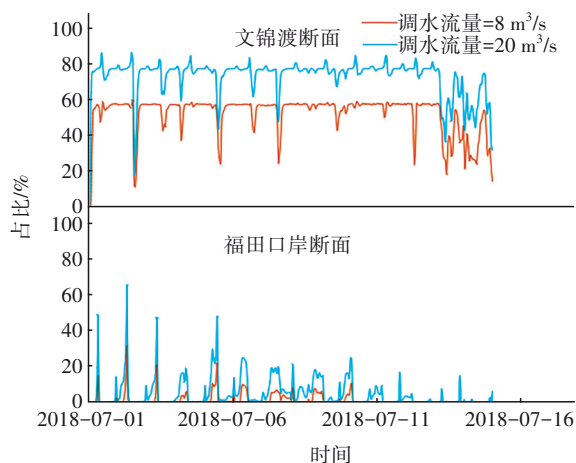


图5 深圳河不同断面来水组成

Fig.5 Composition of inflow at different cross sections of Shenzhen River

3.3 国控断面调水方案研究

以深圳河口国控断面作为研究对象,进一步分析不同水库调水方案对断面水质的影响。分别从来水组成模型和水质模型两个角度进行模拟分析。

① 来水组成模型模拟分析

为了掌握不同调水方案的具体时效性,选定深圳水库和金湖下库作为调水水源,采用来水组成模型模拟两种调水方案,研究调水水源对国控断面的影响,设置调水流量分别为10、20、 $40 \text{ m}^3/\text{s}$,模拟计算结果如图6所示。可以看出:①随着调水流量的增大,国控断面处调水水源来水的占比增大;②从深圳水库调水10~ $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,水源来水到达国控断面处需18 h左右,当流量增大到 $40 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,可缩短至8 h左右;③从金湖下库调水时,水源来水到达国控断面处大约需要8 h(当调水流量为10~ $20 \text{ m}^3/\text{s}$

时,8 h后到达国控断面的水源来水较少,主体来水到达需要15 h左右)。

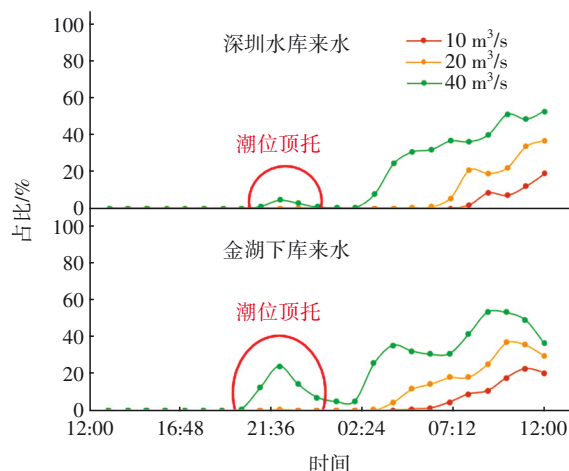
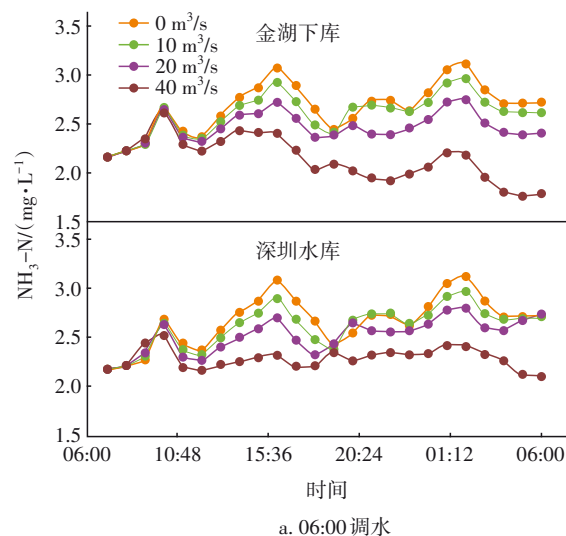


图6 深圳河断面来水占比与来水流量的关系

Fig.6 Relationship between inflow proportion and inflow discharge at cross section of Shenzhen River

② 水质模型模拟分析

根据前文断面水质与降雨量的相关性分析,选取20 mm降雨量条件,对深圳水库和金湖下库分别调水时深圳河口国控断面处的水质变化情况进行分析,分别模拟了在06:00和12:00这两个不同时刻对两个水库进行调度,以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标为例,调度结果如图7所示。可知,不同时间调度对深圳河口水质的改善效果不一,相同调度期内,12:00调水对断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的改善效果要明显优于06:00;另外,从金湖下库调水对断面水质的改善效果要优于深圳水库,相同调度流量下金湖下库来水可以更快地改善深圳河口水质。



a. 06:00 调水

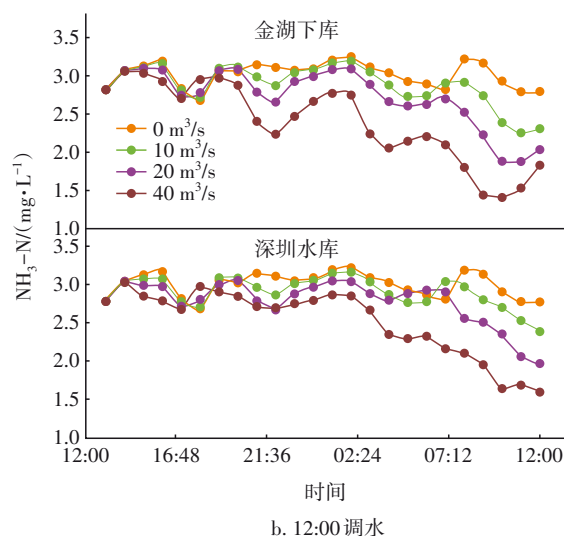


图7 不同调水时刻和调水流量下深圳河口断面水质变化
Fig.7 Changes in water quality at Shenzhen River estuary under different water diversion times and flow rates

4 结论

① 通过构建来水组成模型和水质模型分析深圳河的调水效果,当从深圳水库调水 $10\sim 20\text{ m}^3/\text{s}$ 时,水源来水到达深圳河口国控断面处需 18 h 左右,当调水流量增大到 $40\text{ m}^3/\text{s}$ 时,水源来水到达时间可缩短到 8 h 左右;从金湖下库调水 $10\sim 20\text{ m}^3/\text{s}$ 时,水源来水到达深圳河口国控断面处需 8 h 左右。相同调度期内,在 20 mm 降雨量条件下,12:00 引水对断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的改善效果优于 06:00 引水;相同流量下金湖下库的调水效果优于深圳水库。

② 本研究针对深圳河断面的调水效果分析从定性转为定量,对实际调水方案的确定具有一定的参考价值。后续在调度方案上针对下游潮位的影响可作进一步研究。

参考文献:

- [1] 张凤山,魏俊,唐颖栋,等. 流域水环境模型在茅洲河流域系统治理中的应用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(24): 100-106.
ZHANG Fengshan, WEI Jun, TANG Yingdong, *et al.* Application of watershed water environmental model in the systematic management of Maozhou River Basin[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(24): 100-106

(in Chinese).

- [2] 程鹏,李明远,楼凯,等. 深圳河湾流域溢流污染规律及其对海湾水质的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, 57(1): 132-142.
CHENG Peng, LI Mingyuan, LOU Kai, *et al.* Impact of overflow pollution on water quality in Shenzhen Bay[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021, 57(1): 132-142 (in Chinese).
[3] 汤钟,张亮,俞露,等. 深圳福田区水环境综合治理方案探索与实践[J]. 中国给水排水, 2020, 36(18): 7-12.
TANG Zhong, ZHANG Liang, YU Lu, *et al.* Exploration and practice of comprehensive treatment scheme of water environment in Futian District of Shenzhen [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(18): 7-12 (in Chinese).
[4] 程文辉,王船海,朱琰. 太湖流域模型[M]. 南京: 河海大学出版社, 2006.
CHENG Wenhui, WANG Chuanhai, ZHU Yan. Taihu Lake Basin Model [M]. Nanjing: Hohai University Press, 2006 (in Chinese).
[5] 陈钢,赵艳红,王晓书,等. 河网地区洪水预报模型开发及在长江下游地区的应用[J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(3): 8-15.
CHEN Gang, ZHAO Yanhong, WANG Xiaoshu, *et al.* Development of flood forecasting models in river network areas and the application in the lower reaches of the Yangtze River[J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34(3): 8-15 (in Chinese).
[6] 王船海,郑世威,李小宁,等. 基于太湖流域模型的城市内涝过程高效模拟[J]. 水科学进展, 2022, 33(3): 462-473.
WANG Chuanhai, ZHENG Shiwei, LI Xiaoning, *et al.* Efficient simulation of urban flood inundation based on Taihu Lake basin model [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(3): 462-473 (in Chinese).

作者简介:陈凯(1991-),男,江苏淮安人,硕士,工程师,主要从事河流海岸水动力学、环境及数值模拟方面的研究。

E-mail: 13611595132@163.com

收稿日期:2024-09-26

修回日期:2024-10-29

(编辑:刘贵春)